



João Pedro Fernandes Iria

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Transmissão de Calor em Regimes Periódico e Transitório com recurso a Arduino

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: João José Lopes de Carvalho, Professor Auxiliar,
FCT-UNL

Co-orientador: Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor Auxiliar,
FCT-UNL

Júri

Presidente: José Fernando de Almeida Dias
Vogais: Diana Filipa da Conceição Vieira
João José Lopes de Carvalho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2018

Transmissão de Calor em Regimes Periódico e Transitório com recurso a Arduino

Copyright © João Pedro Fernandes Iria, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos que estão, e aos que eu gostava que estivessem.

Agradecimentos

Ao Professor João Lopes de Carvalho, por ter aceite a minha proposta numa fase da sua vida que lhe era pouco favorável, pelo entusiasmo que demonstrou por este projecto, e pelo suporte escrito que disponibilizou.

Ao Professor Luís Gil, pela infinita paciência para com as minhas perguntas e inseguranças, por me ter compelido a tomar decisões por mim, por me motivar e pela liberdade que me deu para trabalhar no laboratório.

À minha família. Em especial à minha tia, que só é tia em nome, sendo acima de tudo mãe, que todos os dias do meu percurso académico fez questão de me lembrar quem eu sou e o que valho, mesmo quando o mau feitio aperta. Às minhas irmãs e cunhados (ou irmãos), Susana, Charles, Rita, Eduardo, Joana e José, por me proporcionarem sempre um porto de abrigo, mesmo quando a distância é mais que muita.

Aos meus amigos, em especial ao André Vieira, Pedro Neves, João Carmo, Diogo Coelho e Renata Oliveira, pelas voltas ao quarteirão para "arejar" e as conversas infindáveis sobre tudo e mais alguma coisa.

Ao Diogo Ruivo, por me ter introduzido ao mundo do Arduino e ter sido sempre uma das pessoas mais prestáveis que tenho o prazer de conhecer e chamar amigo.

To Kivilcim Baler, who so hastily translated an article from turkish to english, and is one of the truest friends I could find so far from home.

Por fim à Lúcia Cruz, pelo valor incalculável que tem para mim, pela ajuda que me deu na revisão do código e do texto, por me motivar mais que ninguém, por me aturar e acreditar em mim. E por ser a minha namorada, claro.

Muito obrigado a todos!

Resumo

A Transmissão do Calor é uma unidade curricular fundamental para alunos que pretendam dedicar-se à vertente de Energia em Engenharia. De acordo com a matéria leccionada na disciplina, os capítulos cuja componente prática é passível de implementar num ambiente de laboratório (concretamente, no Laboratório de Termodinâmica e Dinâmica de Flúidos da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa) são os estudos da convecção em regime transitório (convecção livre) e regime periódico (convecção forçada).

No mercado de componentes electrónicos, nos últimos anos tem-se verificado uma forte aposta e desenvolvimento em plataformas de prototipagem electrónica de baixo custo, que permitem uma variedade de utilidades nos mais diversos contextos. A medição de temperaturas com auxílio de termopares é uma dessas utilidades, e o Arduino é uma das mais importantes marcas de placas no mercado.

A minha proposta para esta dissertação consistiu na conjugação de ambos os elementos supracitados: implementar Arduino nas actividades experimentais para os regimes transitório e periódico, de modo a reactivar os trabalhos práticos laboratoriais de Transmissão do Calor. Foi um processo de aprendizagem e aprimoramento do conhecimento da linguagem C++, bem como das componentes físicas do Arduino e ligações a efectuar, tanto a *breadboards* como aos módulos de conversão de sinal analógico para digital e termopares.

Esta implementação foi conseguida com sucesso, tendo sido evitado ao máximo o ruído inerente ao motor do túnel aerodinâmico, no caso da actividade experimental de regime periódico.

Além da realização pessoal na óptica do desafio de adquirir conhecimento numa área sobre a qual pouco sabia, existe uma componente de deixar um contributo na instituição onde me formei que permita aos alunos de anos vindouros terem uma aprendizagem mais completa e interessante, bem como materializar a minha gratidão pela dita instituição, pelo papel crucial na minha formação pessoal e profissional.

Palavras-chave: Transmissão do calor, termopar, convecção livre, convecção forçada, regime periódico, regime transitório, Arduino

Abstract

Heat Transfer is a fundamental subject for students who have aspirations to the Energy branch, in Engineering. According to the programme, the chapters on transient free convection and periodic forced convection are interesting and possible of implementation in an environment of laboratory (especifically, the Laboratory of Thermodynamics and Fluid Dynamics of Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa).

In recent years, a strong commitment and development in low cost single-board microcontrollers has happened. Microcontrollers that allow a variety of utilities. Measurement of temperatures, resorting to thermocouples is one of those utilities, and Arduino is one of the most important producers of those boards nowadays.

The work I proposed, and laboured on, consisted in combining the both concepts above: implementing Arduino boards to the experimental activities, in order to reactivate the Heat Transfer laboratorial classes. It was a process of learning and enhancement of the knowledge of C++ and Arduino's components and accessories, such as breadboards and converters, and thermocouples.

This project was successfully implemented, prominently the reduction of noise due to the aerodynamic tunnel engine in the periodic regime experiment.

Personally, it was very satisfying to successfully achieve completion of this work. To overcome the challenge of working in a field I was not fully aware of, to be able to say that I left some sort of footprint in the Institution I graduated from. To feel that the students that come after me will have a better education, and I contributed to it somehow.

Keywords: Heat transfer, thermocouple, transient free convection, periodic forced convection, Arduino.

Índice

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Nomenclatura	xix
Acrónimos	xxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos	2
2 Estudo Bibliográfico	3
2.1 Regime Transitório	3
2.1.1 Método de Separação de Variáveis	3
2.1.2 Método da Análise Concentrada	4
2.2 Regime Periódico	6
2.2.1 Resposta a uma Excitação Harmónica Simples	6
2.2.2 Resposta a Qualquer Tipo de Excitação Periódica	7
2.3 Estado da Arte	8
2.3.1 Raspberry Pi	8
2.3.2 Arduino	9
2.3.3 Arduino em Medição de Temperaturas	9
3 Materiais Necessários, Procedimentos e Medições Experimentais	11
3.1 Materiais Necessários	11
3.1.1 Regime Transitório	11
3.1.2 Regime Periódico	11
3.2 Procedimentos e Medições Experimentais	12
3.2.1 Regime Transitório	12
3.2.2 Regime Periódico	12

3.3	Placa de Aquisição	13
3.3.1	Placa Existente	13
3.3.2	Placa Proposta	13
3.4	Sonda de Medição da Temperatura	14
4	Montagens e Implementação	17
4.1	Regime Transitório	17
4.2	Regime Periódico	18
4.3	Ligações no Arduino	20
4.4	Programação	21
5	Resultados	23
5.1	Regime Transitório	23
5.2	Regime Periódico	27
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	31
6.1	Conclusões	31
6.2	Trabalhos Futuros	32
	Bibliografia	33
I	Anexo I	35
II	Anexo II	41

Lista de Figuras

2.1	Parâmetros em placa de espessura $2L$ em regime transitório	4
2.2	Exemplos onde se pode (a) e não se pode (b) aplicar o método da análise concentrada	5
2.3	Exemplo de Raspberry Pi	8
2.4	Exemplo de Arduino UNO	9
3.1	National Instruments SCXI-1000	13
3.2	Arduino UNO	14
3.3	Esquema de termopar	15
3.4	Força electromotriz produzida por um fio	15
3.5	Sistema de medição por termopares	15
3.6	Módulo MAX6675	16
3.7	Módulo MAX31855	16
4.1	Montagem da Actividade Experimental em Regime Transitório	18
4.2	Montagem da Actividade Experimental em Regime Periódico	19
4.3	Detalhe do cilindro e termopares na Actividade Experimental em Regime Periódico	19
4.4	Esquema eléctrico dos módulos e LCD ligados ao Arduino	21
5.1	Evolução temporal da temperatura do disco e da temperatura ambiente . . .	23
5.2	Arrefecimento do disco	24
5.3	Evolução temporal de $\frac{\theta}{\theta_0}$	24
5.4	Evolução temporal da temperatura do disco e da temperatura ambiente . . .	25
5.5	Arrefecimento do disco	26
5.6	Evolução temporal de $\frac{\theta}{\theta_0}$	26
5.7	Evolução temporal das temperatura do cilindro e do túnel	27
5.8	Evolução temporal das temperatura do cilindro e do túnel	27
5.9	Aproximação à curva teórica com uma harmónica	28
5.10	Aproximação à curva teórica com duas harmónicas	29

5.11 Aproximação à curva teórica com três harmónicas	29
5.12 Aproximação à curva teórica com quatro harmónicas	30

Lista de Tabelas

3.1	Especificações técnicas da SCXI-1000	13
3.2	Especificações técnicas de Arduino UNO	14
3.3	Especificações técnicas de Termopar do tipo K	16

Nomenclatura

A - Área de permuta térmica
 α - Difusividade térmica
 a_n, b_n e c_n - Coeficientes de série de Fourier
 c - Calor específico
 D - Diâmetro do cilindro
 h - Coeficiente de transmissão de calor por convecção
 \bar{h} - Coeficiente médio de transmissão de calor por convecção
 k - Condutividade térmica do material
 L - Espessura de placa
 n - Número de ordem da harmónica
 T - Temperatura
 T_s - Temperatura na superfície do corpo
 T_1 - Temperatura média
 T_∞ - Temperatura ambiente (ou no infinito)
 ΔT - Amplitude da oscilação térmica
 T - Período
 t - Tempo
 V - Volume
 ω_n - Frequência angular referente à harmónica n
 ω - Frequência angular
 ρ - Massa volúmica
 τ - Constante de tempo no modelo de análise concentrada
 φ - Ângulo de fase da excitação
 φ_n - Ângulo de fase da excitação referente à harmónica n
 ψ - Ângulo de fase da resposta
 ψ_n - Ângulo de fase da resposta referente à harmónica n

Acrónimos

Bi - Número de Biot

Introdução

1.1 Motivação

No decorrer do percurso académico de diversos estudantes, nomeadamente de Engenharia, é frequente surgir a questão “*Mas de onde vem esta matéria/assunto, e que aplicações terá na vida real?*”. A maioria dos alunos não chega sequer a verbalizá-la, remetendo-se a assimilar conceitos que lhes parecem alienígenas, interiorizá-los, e posteriormente debitá-los nas provas de avaliação que lhes permitem a aprovação nessa unidade curricular. Outros concluem que não merece o esforço questionar, justificando que “*não vou voltar a olhar para isto na vida*”. Existe também o grupo dos que fazem um esforço mental para tentar idealizar situações concretas, com maior ou menor dificuldade, onde se possam aplicar estes ditos conceitos abstractos. Poucos chegam a perguntar aos Professores. Na maioria dos casos em que a pergunta chega ao Professor, não há meios, não há disponibilidade, não há tempo para estas demonstrações práticas.

O meu percurso não foi diferente. Não em uma, mas em várias disciplinas. Mais concretamente na disciplina de Transmissão do Calor. Será muito mais simples e interessante compreender a distinção entre convecção livre e convecção natural se tivermos a possibilidade de nos debruçar sobre as diferenças práticas, em vez de nos focarmos só nas aulas teóricas, ou nos capítulos da bibliografia sugerida? Não será mais agradável, tanto para os estudantes como para o Professor, existir uma componente pratico-laboratorial (sempre que possível) de modo a simplificar os métodos de ensino e aprendizagem? Em suma, não será pedagogicamente mais positivo? A minha humilde resposta é, simplesmente, sim. Acredito profundamente que este tipo de abordagem ao ensino/aprendizagem pode beneficiar todas as pessoas envolvidas. Creio que pode potenciar a capacidade de compreensão do aluno, bem como a sua criatividade, mas também proporciona ao Professor uma situação diferente, que saia da sua rotina, e que (por vezes) lhe faça relembrar os motivos que o levaram a apreciar a temática que leccionam, e que os queiram transmitir aos seus estudantes. E, para Professor e estudantes, ainda mais interessante pode ser quando estas actividades são conseguidas através da utilização de tecnologia actualizada.

É por este motivo que me proponho a reactivar duas actividades experimentais no âmbito da disciplina de Transmissão do Calor. Duas actividades que, quando frequentei a disciplina, não estavam disponíveis, e que, como em tantos outros casos, me fizeram falta para responder a tantas perguntas, e ajudar a clarificar conceitos.

1.2 Objectivos

O processo desenvolvido assenta maioritariamente na aplicação do modelo de análise concentrada ao regime transitório (em convecção natural), e no regime periódico (em convecção forçada). Como tal, é necessário um domínio e conhecimento consideráveis destes subcapítulos afectos à área da Transmissão do Calor. Nesse sentido, no capítulo 2 é efectuada uma pesquisa bibliográfica, tanto no campo do conhecimento consagrado (para atingir uma maior familiaridade com o tema, preenchendo lacunas que surgiram ao longo do percurso académico, e expandindo o mesmo), para servir de suporte teórico às actividades experimentais desenvolvidas, como no estado da arte (de modo a promover desenvolvimentos progressivos, impedindo a estagnação das aplicações tecnológicas possíveis de incorporar nos processos), sobretudo no que diz respeito a equipamentos, preferencialmente de baixo custo financeiro.

No capítulo 3 explora-se a componente mais prática do trabalho prévio às actividades experimentais propriamente ditas. Referir as medições que são necessárias efectuar, os equipamentos que serão necessários adquirir, ou que existem no Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e possam ser utilizados, e fazer uma previsão das montagens desses mesmos equipamentos.

No capítulo 4 ficam explícitas as montagens efectuadas e os materiais utilizados para tal efeito.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos através da implementação das montagens pretendidas.

No capítulo 6 consta uma reflexão final sobre a globalidade deste trabalho e perspectivas de continuidade do mesmo no futuro.

Estudo Bibliográfico

2.1 Regime Transitório

Nos casos em que as condições de fronteira de um sólido variam com o tempo, deixa de ser possível, e válido, aplicar os modelos de análise em regime permanente, e entra-se no domínio dos modelos de análise dinâmicos, ou regime transitório.

Embora seja mais realista dizer que a evolução da temperatura varia de acordo com $T(x, y, z, t)$, pode simplificar-se a uma única dimensão. Exactamente por motivos de simplicidade, aqui considerar-se-á apenas uma dimensão, ou seja, $T(x, t)$.

2.1.1 Método de Separação de Variáveis

Citando Holman [7], para uma demonstração deste método, considera-se uma placa infinita com espessura $x = 2L$. Inicialmente a placa está à temperatura $T = T_s$, e em $t = 0$, a temperatura é subitamente arrefecida à superfície para $T = T_1$. Partindo da equação diferencial

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

e aplicando

$$\theta = T - T_1$$

obtém-se

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.2)$$

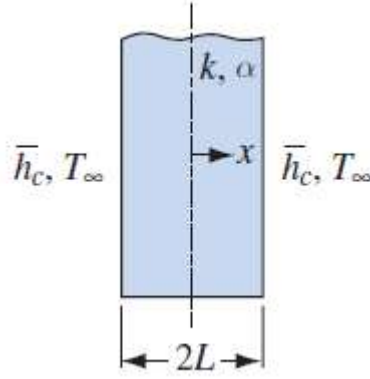


Figura 2.1: Parâmetros em placa de espessura $2L$ em regime transitório

Fonte: Kreith et al. [9]

De modo a poder prosseguir para a solução, é importante definir o produto $\theta(x, t) = X(x).H(t)$, resultando nas equações diferenciais ordinárias:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \lambda X = 0 \quad \frac{dH}{dt} + \alpha \lambda^2 H = 0 \quad (2.3)$$

em que λ^2 é a constante de separação. Com $\lambda^2 > 0$, para satisfazer as condições de fronteira, a solução fica na forma:

$$\theta = (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x).e^{-\lambda^2 \alpha t} \quad (2.4)$$

Pelas condições de fronteira pode concluir-se que, na sua forma final tem-se

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-[\frac{n\pi}{2L}]^2 \alpha t} \sin \frac{n\pi x}{2L} \quad (2.5)$$

Com a expansão em série de senos de Fourier, fica então a solução final:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_1}{T_i - T_1} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-[\frac{n\pi}{2L}]^2 \alpha t} \sin \frac{n\pi x}{2L} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (2.6)$$

2.1.2 Método da Análise Concentrada

Outro método para a análise da evolução temporal da temperatura do corpo é o método da análise concentrada, em que a temperatura do corpo pode ser considerada praticamente uniforme em cada instante: $T(x, t) \approx T(t)$. O modelo da análise concentrada permite simplificar estas mesmas situações.

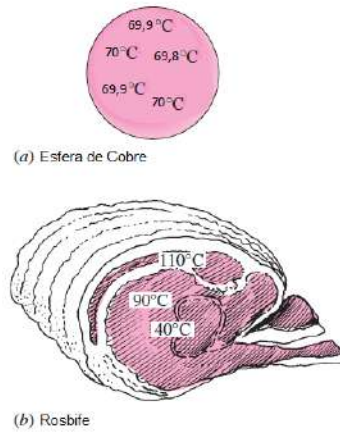


Figura 2.2: Exemplos onde se pode (a) e não se pode (b) aplicar o método da análise concentrada

Fonte: Adaptado de Çengel [3]

Ainda que seja concretamente heterogénea, devido a existir sempre um gradiente de temperatura no interior do sólido, a distribuição de temperaturas é assumida como uniforme em cada instante, e é analisada como tal. Esta distribuição de temperaturas, hipoteticamente uniforme, advém do facto da resistência à condução ser muito inferior à resistência de convecção, e estas duas resistências são relacionadas e quantificadas através do número de Biot:

$$Bi = \frac{hV}{kA} \quad (2.7)$$

De notar que V/A traduz-se numa dimensão característica do corpo. Segundo Holman [7], a condição de homogeneidade referida exige números de Biot inferiores a 0,1. Pegando na lei de Newton para o arrefecimento

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.8)$$

e aplicando a conservação da energia nestas condições, chega-se à seguinte igualdade:

$$-\rho c V dT = hA(T - T_\infty)dt \quad (2.9)$$

Agrupando os termos diferenciais obtém-se:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau} T = \frac{t}{\tau} T_\infty \quad (2.10) \quad e \quad \tau = \frac{\rho c V}{hA} \quad (2.11)$$

A constante de tempo τ condensa as propriedades do corpo e do escoamento, mostrando-se um parâmetro essencial. Assumindo para condição inicial a temperatura do corpo constante, e igual a T_0 , apresenta-se a solução:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.12)$$

Ao assumir $t = \tau$ nesta expressão, pode concluir-se que a constante de tempo τ é representativa do tempo necessário para o sistema reduzir para 36,8% a diferença inicial de temperaturas.

2.2 Regime Periódico

O regime periódico rege-se pela resposta de um corpo (ou sistema) a uma flutuação harmónica da temperatura envolvente.

2.2.1 Resposta a uma Excitação Harmónica Simples

Explanando primeiro a resposta de um sistema a uma excitação harmónica simples, começa-se por aplicar a equação da conservação da energia

$$q = hA(T - T_{\infty}) = \rho c V \frac{dT}{dt} \quad (2.13)$$

Assumindo a constante de tempo τ , tem-se

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{1}{\tau} [T_1 + \Delta T \sin(\omega t + \varphi)] \quad (2.14)$$

e com $T - T_1 = \theta$ obtemos finalmente a equação diferencial

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{\tau} = \frac{\Delta T}{\tau} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.15)$$

Se se assumir $\theta = f(t)e^{-\frac{t}{\tau}}$, pode então substituir-se na expressão (2.15), para obter $f(t)$. Através de mais manipulações matemáticas, chega-se a

$$f(t) = \frac{\Delta T}{1 + (\omega\tau)^2} e^{\frac{t}{\tau}} [\sin(\omega t) \cos(\varphi) + \cos(\omega t) \sin(\varphi) - \omega t \cos(\varphi) \cos(\omega t) + \omega t \sin(\varphi) \sin(\omega t)] + b$$

Por fim, obtém-se a forma final de $f(t)$.

$$f(t) = \frac{\Delta T}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} e^{\frac{t}{\tau}} [\sin(\omega t + \psi)] + b \quad (2.16)$$

Através de relações trigonométricas, acha-se ψ a partir de φ . Por fim chega-se à expressão para $T(t)$.

$$T(t) = T_1 + \frac{\Delta T}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\omega t + \psi) + b e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.17)$$

em que $T_1 + \frac{\Delta T}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \sin(\omega t + \psi)$ é a solução forçada, e $be^{-\frac{t}{\tau}}$ é a solução livre amortecida.

Determinando b a partir das condições iniciais ($t = 0$ e $T = T_0$), obtém-se

$$b = T_0 - T_1 + \frac{\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2} \cos(\varphi) + \frac{\Delta T}{1+(\omega\tau)^2} \sin(\varphi) \quad (2.18)$$

2.2.2 Resposta a Qualquer Tipo de Excitação Periódica

Após explanar a resposta a uma excitação harmónica simples, pode dar-se o passo seguinte, e generalizar para qualquer tipo de excitação periódica. Qualquer função periódica, desde que tenha derivada continua $p(t)$, pode ser desenvolvida em série de Fourier, verificando-se

$$p(t) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)) \quad (2.19)$$

em que $\omega_n = \frac{2\pi}{T}n$. Determinando os coeficientes a_n e b_n

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T p(t) \cos(\omega_n t) dt \quad (2.20)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T p(t) \sin(\omega_n t) dt \quad (2.21)$$

Pode usar-se a correlação

$$a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t) = c_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

com

$$c_n = \frac{a_n}{\sin(\varphi_n)} \quad (2.22)$$

e

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \quad (2.23)$$

Rearranjando a série de modo a usar apenas o termo \sin leva à expressão

$$p(t) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (c_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)) \quad (2.24)$$

Considere-se, neste caso, a análise concentrada sujeita a uma excitação periódica $f(t)$. Assumindo a expressão (2.10), é possível escrever

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau}T = \frac{1}{\tau}p(t) \quad (2.25)$$

o que, com $p(t)$ periódica, tem a seguinte série de Fourier:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau}T = \frac{1}{\tau} \frac{a_0}{2} + \left[\sum_{n=1}^{\infty} (c_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)) \right] \quad (2.26)$$

A característica de linearidade da expressão (2.26) permite uma sobreposição das soluções isoladas de cada harmónica da excitação. Assim, a solução é obtida através da soma infinita de todas as soluções isoladas.

2.3 Estado da Arte

Como referido na secção 1.2, a principal inovação será a inclusão de tecnologia actualizada de baixo custo numa actividade experimental que se encontra inactiva, de modo a providenciar uma maior robustez e fiabilidade, nomeadamente no que diz respeito à aquisição de dados. Nesse sentido foram propostos dois equipamentos possíveis para obter o efeito pretendido: o Raspberry Pi e o Arduino UNO. Nas subsecções seguintes constará o contexto de cada um, e a comparação entre ambos.

2.3.1 Raspberry Pi

O Raspberry Pi foi oficialmente lançado em 2011. Trata-se de uma placa de pequenas dimensões com sistema operativo próprio, de baixo custo, que pode ser programado através da conexão a um monitor, rato e teclado convencionais, e funciona como um computador. A sua programação assenta na linguagem *Python* e pode correr diversos programas ao mesmo tempo.



Figura 2.3: Exemplo de Raspberry Pi

Fonte: www.raspberrypi.org

A grande desvantagem do Raspberry Pi é o facto de não ter incluída memória própria. No entanto, permite a introdução de um cartão SD para armazenamento de dados. Por fim, a sua alimentação é assegurada por uma tensão de 5 V.

2.3.2 Arduino

O Arduino é um equipamento que está no mercado desde 2005, cuja popularidade tem vindo a crescer ao longo do tempo. Trata-se de uma placa constituída por um controlador, pinos analógicos e digitais de entrada e saída e entradas USB, que permitem uma conexão por serial.



Figura 2.4: Exemplo de Arduino UNO

Fonte: www.arduino.cc

É um produto de pequenas dimensões (ou seja, apropriado para um espaço laboratorial experimental devido à sua componente portátil), custo relativamente baixo, simples programação em código aberto, e facilmente se transferem os dados adquiridos para um computador. Será necessária uma fonte de alimentação externa, com uma tensão de alimentação de voltagem entre 7 e 12 V, e a placa e circuitos funcionam com tensões entre 3,3 e 5 V. A placa é também reprogramável sem a obrigação de recurso a um *hardware* específico de programação, sendo essa programação efectuada através de um *software* gratuito, disponível *online*, numa linguagem assente em C++.

A principal desvantagem do Arduino é correr apenas um programa de cada vez. No entanto, devido à sua simplicidade e ser propício para tarefas repetitivas, ao contrário do Raspberry Pi, torna-o o equipamento a utilizar.

2.3.3 Arduino em Medição de Temperaturas

Segundo Gandra et al. [4], o Arduino NANO acoplado com um termopar foi implementado com sucesso na medição e registo da evolução temporal durante vários dias em

exteriores, na sua experiência.

Em Gao et al. [5], o Arduino MICRO foi utilizado para medir tensões analógicas de modo a determinar a temperatura de um termistor, também com sucesso.

Em Gosai e Bhavsar [6], o Arduino UNO R3 foi implementado com sucesso enquanto ferramenta para registrar e converter para sinal digital as variações de temperatura da ferramenta de corte na experiência de torneamento.

Materiais Necessários, Procedimentos e Medições Experimentais

3.1 Materiais Necessários

Nesta secção ter-se-á uma lista de todos os materiais necessários para completar as actividades experimentais com sucesso. No entanto, há que ter mais atenção no que toca à placa de aquisição de dados, e à sonda para medição da evolução temporal da temperatura.

3.1.1 Regime Transitório

- Corpo em alumínio (disco de diâmetro 18,8 cm e espessura 1,22 cm ou placa quadrada);
- Mecanismo de suporte do corpo com regulação angular da inclinação do mesmo;
- Placa eléctrica de aquecimento;
- Sonda termopar para medição da temperatura do corpo;
- Sonda termopar para medição da temperatura ambiente;
- Equipamento electrónico com indicação (ou aquisição) digital de temperatura;
- Monitor LCD para mostragem das temperaturas;
- Contador de energia eléctrica.

3.1.2 Regime Periódico

- Túnel aerodinâmico;

- Resistências de aquecimento do ar;
- Temporizador electrónico de comando do circuito de aquecimento;
- Sonda termopar de medição da temperatura do ar no túnel;
- Sonda termopar de medição da temperatura do corpo;
- Cilindro maciço de latão (com diâmetro de 2,5 cm e altura de 12 cm);
- Equipamento electrónico com indicação digital de temperatura;
- Monitor LCD para mostragem das temperaturas;

3.2 Procedimentos e Medições Experimentais

3.2.1 Regime Transitório

No regime transitório, o procedimento passa pelos seguintes passos:

- Medição da temperatura ambiente, no decorrer da experiência;
- Evolução da temperatura do corpo durante o aquecimento até atingir a temperatura máxima desejada (tipicamente entre 170degC e 180degC ;
- Medição da energia eléctrica consumida na fase de aquecimento do corpo;
- Evolução da temperatura do corpo durante a fase de arrefecimento.

Como visto no sub-capítulo 2.1.2, o disco deve ser deixado arrefecer naturalmente até que a diferença de temperatura entre o disco e o ambiente esteja perto de 36,8% da diferença de temperatura máxima atingida. Após as medições experimentais, pretende-se ainda estimar a constante de tempo do sistema com recurso a um programa elaborado no *software* Microsoft Excel, e compará-la com a empírica, recorrendo a 2.12. Com base na curva experimental de arrefecimento, pode estimar-se a constante de tempo que permite obter uma estimativa do coeficiente médio de convecção natural.

3.2.2 Regime Periódico

No regime periódico, procede-se às seguintes medições:

- Período de excitação imposto por um temporizador;
- Evolução temporal da temperatura do ar no túnel;
- Evolução temporal da temperatura do corpo.

Por fim, elabora-se um programa também no *software* MATLAB que permita, através do *input* dos dados adquiridos nas medições, registados no *software* Microsoft Excel, prever a série de Fourier associada, e os seus coeficientes.

3.3 Placa de Aquisição

3.3.1 Placa Existente

A placa actualmente instalada no Laboratório de Termodinâmica e Dinâmica dos Flúidos é a National Instruments SCXI-1000. Apetrechada de quatro *slots*, fornecida por corrente alternada, permite uma análise sem ruído. Funciona com o *software* NI-DAQ, com o complemento LabVIEW, o que simplifica a sua configuração.



Figura 3.1: National Instruments SCXI-1000

Fonte: www.sine.ni.com

Tabela 3.1: Especificações técnicas da SCXI-1000

Voltagem operacional	5 [V]
<i>Input</i> de voltagem recomendado	12 [V]
Limite de <i>input</i> de voltagem	9,5-16 [V]
Pinos analógicos de <i>input</i>	4
Corrente DC por pino de 5 V	50 [mA]

A National Instruments SCXI-1000 apresenta uma fraca componente de portabilidade, o que pode ser prejudicial aquando da disposição das múltiplas actividades experimentais.

3.3.2 Placa Proposta

Como referido na sub-secção 2.3.2, apostar-se-á num Arduino para desempenhar a função de adquirir e registar os dados da evolução temporal nas actividades experimentais. Especificamente, o equipamento escolhido foi o Arduino UNO.



Figura 3.2: Arduino UNO

Fonte: www.arduino.org

Na tabela 3.2 apresentam-se as suas especificações técnicas do Arduino UNO:

Tabela 3.2: Especificações técnicas de Arduino UNO

Micro-controlador	ATmega328
Voltagem operacional	5 [V]
<i>Input</i> de voltagem recomendado	7-12 [V]
Limite de <i>input</i> de voltagem	6-20 [V]
Pinos digitais I/O	14 (6 dos quais permitem <i>output</i> PMW)
Pinos analógicos de <i>input</i>	6
Corrente DC por pino de I/O	40 [mA]
Corrente DC por pino de 3,3 V	50 [mA]
Memória interna	32 [kB]
SRAM	2 [kB] (ATmega328)
EEPROM	1 [kB] (ATmega328)
Velocidade do cronómetro	16 [MHz]

3.4 Sonda de Medição da Temperatura

Existe a possibilidade de medir a temperatura indirectamente, através da variação de uma (ou mais) propriedades físicas do material (comprimento, volume, resistência eléctrica, entre outros) afecta à temperatura. A estas propriedades podem chamar-se de termométricas. Através da medição directa destas propriedades termométricas, torna-se possível (e simples) determinar a temperatura de um dado material.

Neste caso, será medida a resistência eléctrica do material de modo a determinar a temperatura, com a utilização de um termopar.

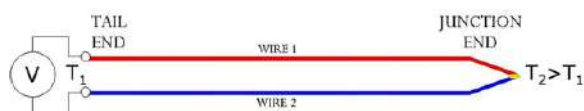


Figura 3.3: Esquema de termopar

Fonte: www.msm.cam.ac.uk

Baseando-se no efeito termoelétrico, ou seja, a junção de dois metais distintos a diferentes temperaturas, gera-se uma força electromotriz (f.e.m.), que é função da composição dos metais e da diferença de temperatura.

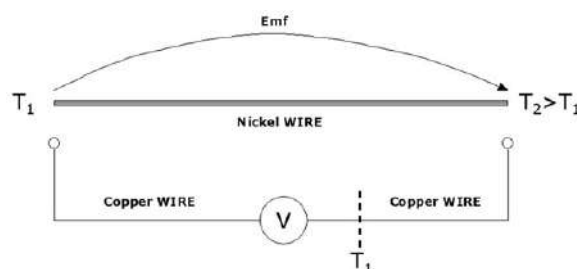


Figura 3.4: Força electromotriz produzida por um fio

Fonte: www.msm.cam.ac.uk

Em geral, uma das junções do termopar, a junção de medida, é colocada em contacto com o objecto cuja temperatura se pretende determinar. Outra junção, a de referência, é mantida a uma temperatura constante determinada pelo utilizador. Os terminais do termopar vão mostrar a f.e.m., que depende da diferença de temperatura entre as duas junções. Os termopares são usados em intervalos de temperatura entre -270 e 4000°C , pelo que é essencial determinar a gama de temperaturas pretendida.

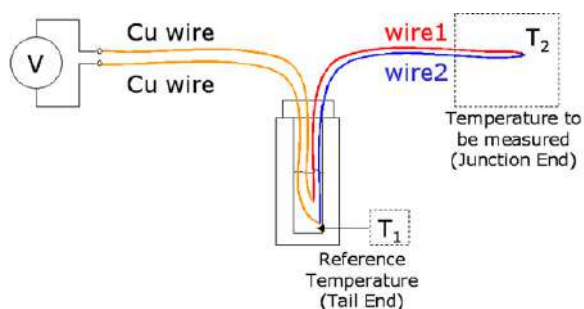


Figura 3.5: Sistema de medição por termopares

Fonte: www.msm.cam.ac.uk

Tendo todos estes factores em conta, é proposto um termopar do tipo K, cujas especificações técnicas estão resumidas na tabela 3.3:

Tabela 3.3: Especificações técnicas de Termopar do tipo K

Metal +	Crómio-Níquel
Metal -	Alumel
Código de cores +/-	Amarelo (+) e Vermelho (-)
Coeficiente de Seebeck	39.4 [μ V / °C] a 0 [°C]
Tolerância padrão	1.1 – 2.9 [°C]
Intervalo de temperaturas	0-600 [°C]
Voltagem operacional	3-5,5 [V]
Sinal convertido para digital	Sim (12-bit)
Resolução de temperatura	0,25 [°C]
Comprimento	1 [m]

Aquando da encomenda dos termopares, estavam incluídos módulos MAX6675, para converter o sinal analógico para digital, e fornecer ao Arduino as leituras da evolução da temperatura. São módulos que permitem leituras de 250 em 250 ms.



Figura 3.6: Módulo MAX6675

Fonte: www.makerlab-electronics.com

No capítulo 5 denota-se que estes módulos, além de descontinuados no mercado, não proporcionam uma análise tão fiável, e são susceptíveis da ocorrência de ruído na actividade experimental. Posto isto, procedeu-se à aquisição de módulos mais modernos. A conexão entre o termopar e o Arduino, e a conversão de dados de analógico para digital será, então, assegurada por um módulo MAX31855. Estes módulos são um *upgrade* dos anteriores, e permitem leituras de 100 em 100 ms.

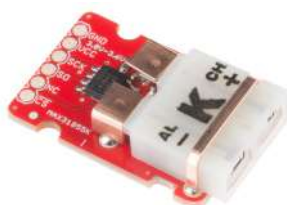


Figura 3.7: Módulo MAX31855

Fonte: www.github.com

Montagens e Implementação

4.1 Regime Transitório

Como referido na subsecção 3.1.1, os materiais necessários são:

- (1) Corpo em alumínio (disco ou placa quadrada);
- (2) Mecanismo de suporte do corpo com regulação angular da inclinação do mesmo;
- (3) Placa eléctrica de aquecimento;
- (4) Sonda termopar para medição da temperatura do corpo;
- (5) Sonda termopar para medição da temperatura ambiente;
- (6) Equipamento electrónico com indicação (ou aquisição) digital de temperatura (Arduino), com LCD acoplado;
- Contador de energia eléctrica.

A figura 4.1, na página seguinte, representa uma fotografia da montagem, devidamente legendada, exceptuando o contador de energia eléctrica.



Figura 4.1: Montagem da Actividade Experimental em Regime Transitório

O corpo de alumínio é encaixado no suporte com regulação angular da inclinação, e consequentemente alinhado com a placa de aquecimento. Um termopar é ligado ao corpo de alumínio (previamente furado com as dimensões do termopar), e o outro fica afastado da instalação para captar a temperatura ambiente. Ambos os termopares são ligados aos respectivos módulos de conversão do sinal analógico para digital, e os pinos desses módulos posicionam-se numa *breadboard* para fazer a conexão ao Arduino. Liga-se a ficha de alimentação da placa de aquecimento ao contador de energia eléctrica, e este à tomada da rede eléctrica nacional, e espera-se até que o disco atinja a temperatura estipulada. Por fim, desliga-se a placa de aquecimento e prossegue-se com a análise da evolução temporal do arrefecimento do disco.

4.2 Regime Periódico

De acordo com a subsecção 3.1.2, os materiais necessários para a experiência em Regime Periódico são:

- (1) Túnel aerodinâmico;
- (2) Resistências de aquecimento do ar;
- (3) Temporizador electrónico de comando do circuito de aquecimento;
- (4) Sonda termopar de medição da temperatura do ar no túnel;
- (5) Sonda termopar de medição da temperatura do corpo;
- (6) Cilindro maciço de latão;

- (7) Equipamento electrónico com indicação digital de temperatura (Arduino), com LCD acoplado;

A figura 4.2 apresenta uma fotografia tirada à montagem completa.

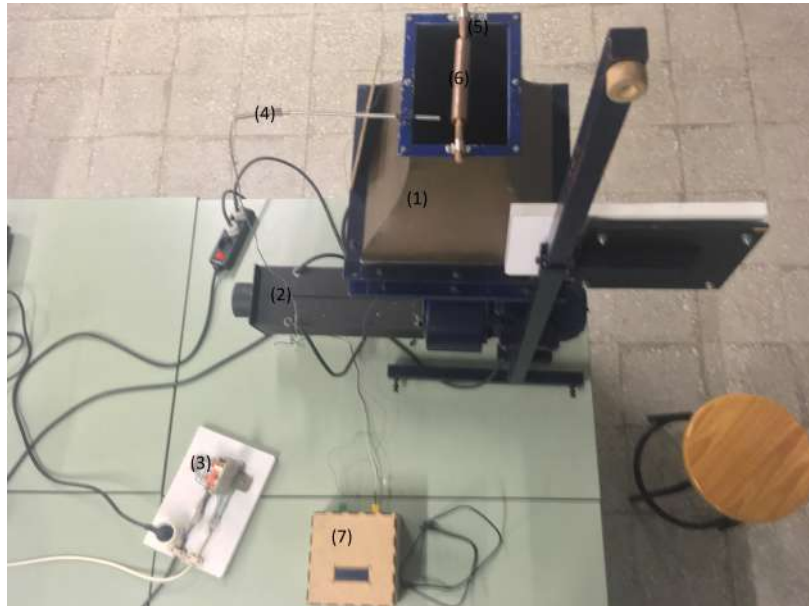


Figura 4.2: Montagem da Actividade Experimental em Regime Periódico

O cilindro e os termopares na saída do túnel aerodinâmico encontram-se na figura 4.3 mais detalhados.

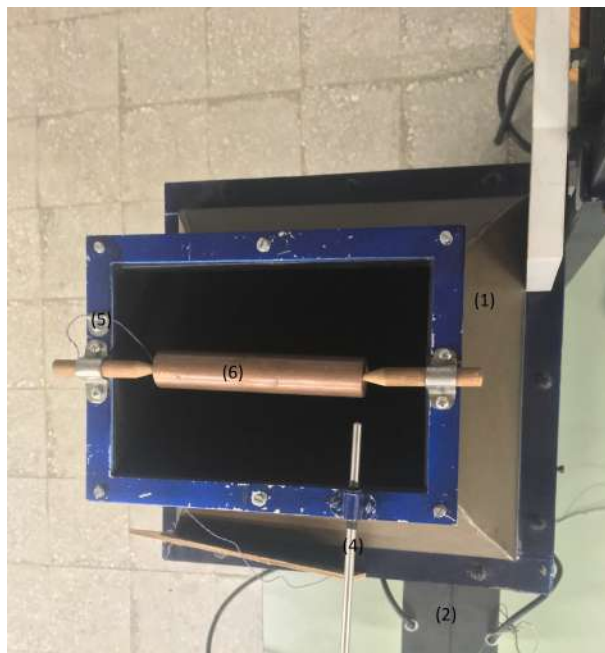


Figura 4.3: Detalhe do cilindro e termopares na Actividade Experimental em Regime Periódico

As três resistências de 1 k Ω disponíveis, inseridas num sistema que as permite serem ligadas em série, estão aparafusadas a uma extremidade do túnel aerodinâmico. Essas resistências ligam-se ao temporizador, que consiste num relé que as vai ligando e desligando, consoante o período estipulado. Na outra extremidade do túnel encontra-se o cilindro de latão. Um termopar localiza-se no cilindro, através de um furo previamente efectuado no eixo do mesmo. O outro termopar fica ao lado do cilindro, de modo a adquirir os valores da temperatura do ar à saída do túnel. Ambos os termopares são, então, ligados às fichas, e estas aos respectivos módulos de conversão do sinal analógico para digital, e os pinos desses módulos posicionam-se numa *breadboard* para fazer a conexão ao Arduino.

4.3 Ligações no Arduino

No que concerne às ligações, é crucial assegurar que as eléctricas sejam implementadas com o máximo de rigor. Qualquer fio mal posicionado, no meio de um número considerável de fios, pode representar não só o mau funcionamento de toda a experiência, bem como a danificação de componentes. Como tal não é desejável, demonstrar-se-á detalhadamente a mais ínfima ligação efectuada.

Começando pelo LCD, liga-se o pino do neutro à *breadboard*, e o da fase aos 5 V do Arduino. Os outros dois pinos são o SDA (*data line*) e o SCL (*clock line*), que formam a interface de comunicação. Estes ligam-se aos pinos analógicos A4 e A5, respectivamente.

Referente aos módulos, há cinco pinos que foram previamente soldados para que se possa encaixar na *breadboard*: um para o neutro, ligado ao neutro da *breadboard*, o da fase ligado aos 3.3 V (por imposição do material) também da *breadboard*, o Chip Select, onde o Arduino reconhece o *chip*, o Clock Pin, que estabelece o relógio. Por fim, o Serial Output é por onde os dados adquiridos da temperatura são transmitidos ao Arduino. A ficha onde o termopar é inserido foi também soldada ao módulo.

Um esquema das ligações pode ser encontrado na figura 4.4. As cores utilizadas no esquema respeitam as dos fios utilizados no laboratório, de modo a simplificar a compreensão.

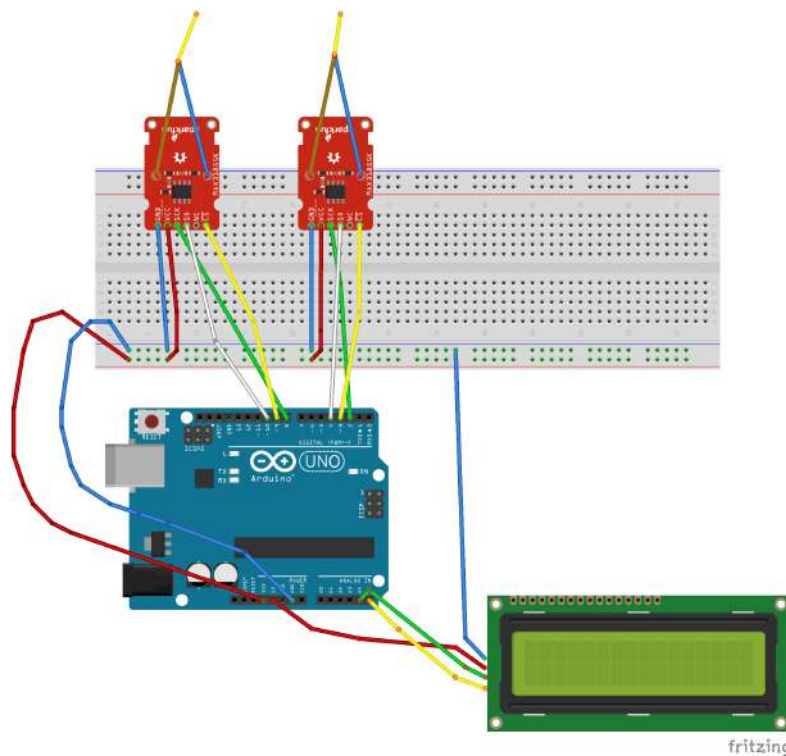


Figura 4.4: Esquema eléctrico dos módulos e LCD ligados ao Arduino

Imagem gerada no *software* Fritzing

4.4 Programação

O algoritmo para a programação do Arduino fundamenta-se essencialmente em três fases: definição de variáveis, o *setup* (ou configuração) e por fim o *loop* (ciclo que será repetido até ser manualmente interrompido). Estruturalmente, os programas para o regime transitório e periódico são semelhantes, mudando apenas os nomes das variáveis (para efeito de simplificação da nomenclatura). Através da conexão do Arduino a um computador por via de USB, os dados são adquiridos em tempo real no Microsoft Excel, com recurso à ferramenta PLX-DAQ, disponível *online* gratuitamente, e os gráficos são também construídos em tempo real.

Detalhando cada uma das fases, tem-se:

- Definição de bibliotecas, entradas, objectos (LCD e termopares) e as variáveis utilizadas;
- Executado apenas uma vez, ao início, o *setup* inicializa o LCD, o contador de leituras e a conexão ao Microsoft Excel;
- Com ciclos cujo período é imposto na definição das variáveis, são efectuadas leituras nos termopares de acordo com a sua frequência máxima de aquisição. Posteriormente, calcula-se a média ponderada dos dados adquiridos nesse intervalo de tempo.

Esse valor é registado no Microsoft Excel, e o ciclo reinicia. Os valores registados são influenciados pelo valor do ciclo anterior, de modo a minimizar os efeitos de ruído, seja das interferências da corrente eléctrica da placa de aquecimento (transitório), ou do motor do túnel aerodinâmico (periódico).

O código foi aprendido com base no livro de projectos da Arduino [1], bem como tutoriais *online*, e, para o regime transitório, está disponível no Anexo I. Para o regime periódico, encontra-se no Anexo II.

Capítulo 5

Resultados

Após a implementação do código nos diversos Arduinos, a montagem das actividades experimentais e a calibração dos termopares, procedeu-se a realizar as ditas experiências, bem como ao tratamento dos dados adquiridos. Foram realizadas experiências em duas instalações semelhantes para o regime transitório, uma com um disco de alumínio, e a outra com um paralelepípedo do mesmo material. Efectuaram-se também experiências em regime periódico, com o auxílio de um túnel aerodinâmico de modo a forçar o ar em contacto com um cilindro de latão.

5.1 Regime Transitório

Numa primeira fase, foram efectuadas experiências com auxílio do módulo MAX6675, a efectuar quatro leituras por segundo, e fazendo uma média entre estas. Obtiveram-se os seguintes resultados:

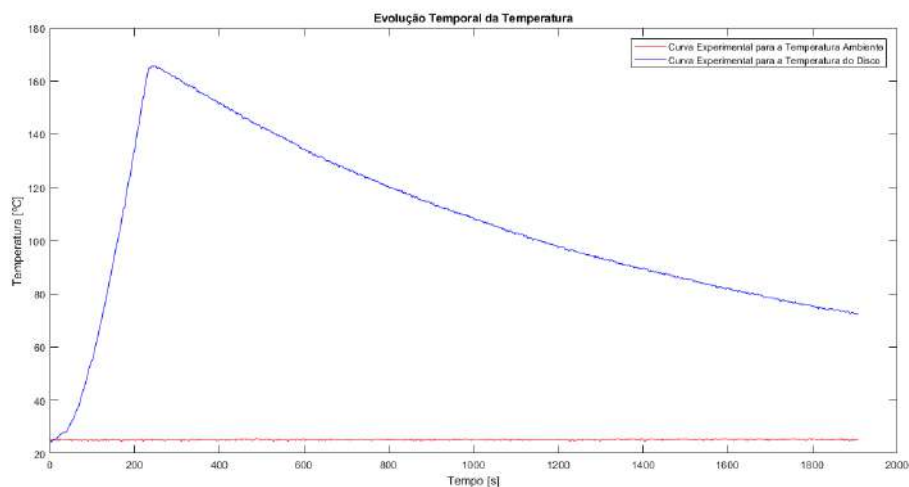


Figura 5.1: Evolução temporal da temperatura do disco e da temperatura ambiente

Imagem gerada no *software* MATLAB

Posteriormente, prosseguiu-se a análise na fase de arrefecimento, colocando o disco com uma inclinação de 90° com a horizontal, sujeito a convecção natural. Na figura 5.2 obtém-se uma aproximação, desprezando a fase de aquecimento, e reiniciando o contador de tempo.

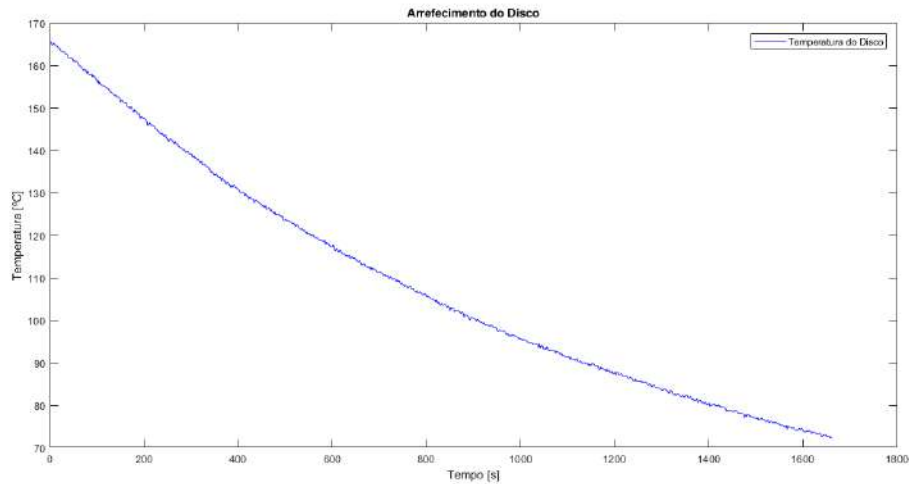


Figura 5.2: Arrefecimento do disco

Imagem gerada no *software* MATLAB

Por fim, para proceder aos cálculos de verificação da validade do método dos parâmetros concentrados, aplica-se $\frac{\theta}{\theta_0}$, como figura em 5.3.

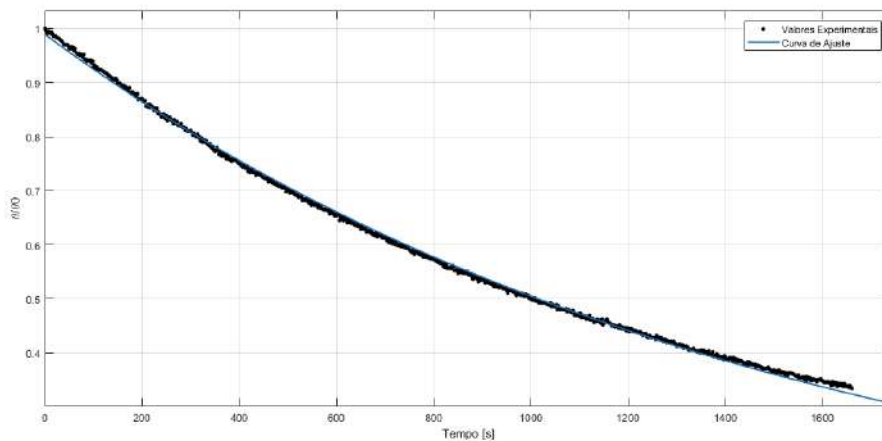


Figura 5.3: Evolução temporal de $\frac{\theta}{\theta_0}$

Imagem gerada no *software* MATLAB

Esta curva de ajuste, obtida pela ferramenta *cftool*, é uma função exponencial que retornou, com uma precisão de 99,9% um valor τ de 1485 s. Será, então, possível proceder ao cálculo empírico de \bar{h} , e de Bi.

Aplicando directamente a expressão (2.11) tem-se $\bar{h} \approx 8,73 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Por fim, utiliza-se a expressão (2.7) para concluir que $Bi = 0,00019$, o que confere validade para que esta experiência possa ser abordada pela análise de parâmetros concentrados.

Repetindo o procedimento para o módulo MAX31855, com dez leituras por segundo, no final da experiência obteve-se o gráfico da evolução temporal da temperatura do disco e da temperatura ambiente nas fases de aquecimento e arrefecimento, demonstrado na figura 5.4.

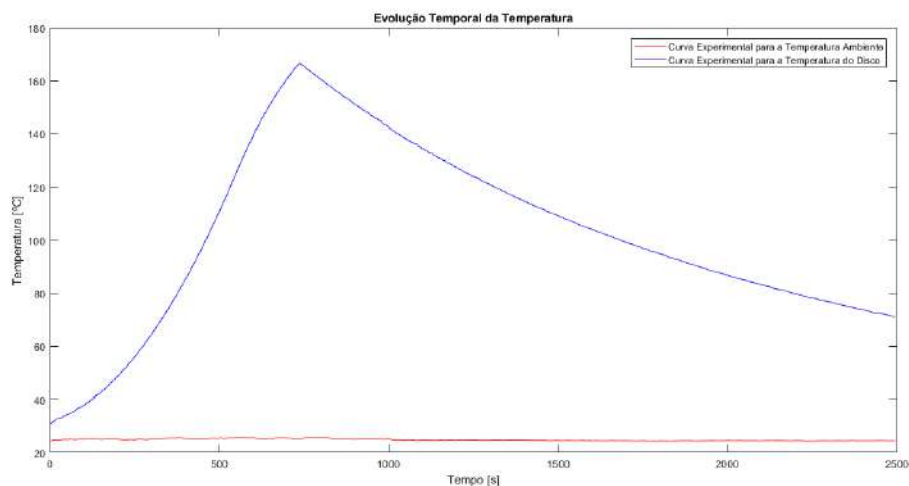


Figura 5.4: Evolução temporal da temperatura do disco e da temperatura ambiente

Imagem gerada no *software* MATLAB

Posteriormente, analisou-se apenas a fase de arrefecimento, colocando o disco com uma inclinação de 90° com a horizontal, sujeito a convecção natural. Considerou-se $t = 0$ no início do arrefecimento, na curva experimental representada na figura 5.5.

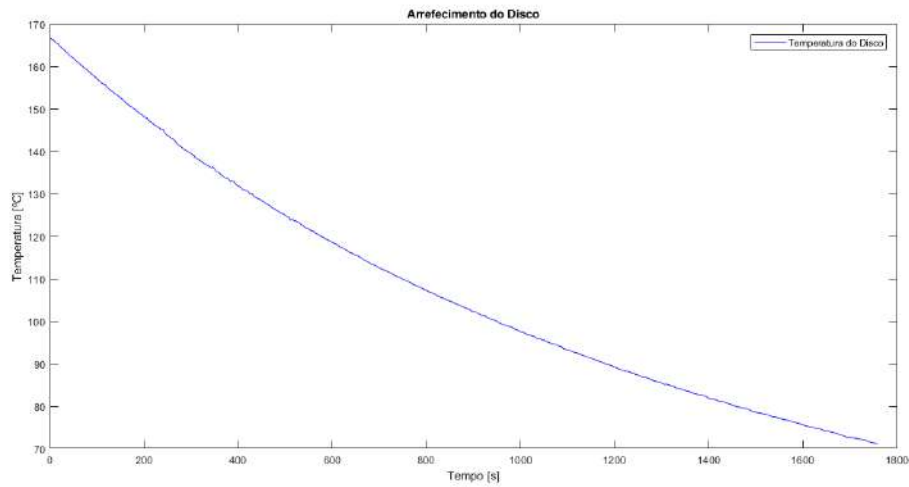


Figura 5.5: Arrefecimento do disco

Imagem gerada no *software* MATLAB

Por fim, para proceder aos cálculos de verificação da validade do método dos parâmetros concentrados, aplicou-se $\frac{\theta}{\theta_0}$, como figura em 5.6

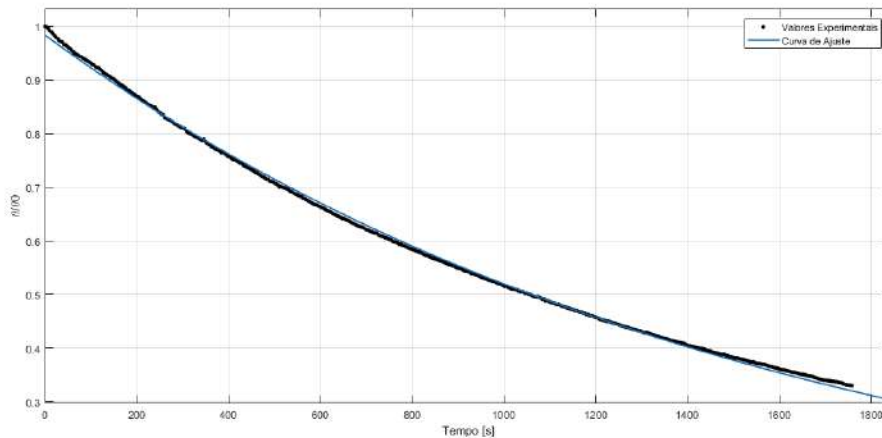


Figura 5.6: Evolução temporal de $\frac{\theta}{\theta_0}$

Imagem gerada no *software* MATLAB

A curva de ajuste, obtida pela ferramenta *cftool* a uma função exponencial retornou, com uma precisão de 99,9%, um valor τ de 1569 s. Será, então, possível proceder ao cálculo empírico de \bar{h} , e de Bi.

Aplicando directamente a expressão (2.11) tem-se $\bar{h} \approx 8,73 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Por fim, utilizou-se a expressão (2.7) para concluir que $\text{Bi} = 0,00022$, o que confere validade para que esta experiência possa ser abordada pela análise de parâmetros concentrados.

5.2 Regime Periódico

Com o módulo MAX6675 a adquirir valores de temperatura a cada 250 ms, obtiveram-se os seguintes resultados:

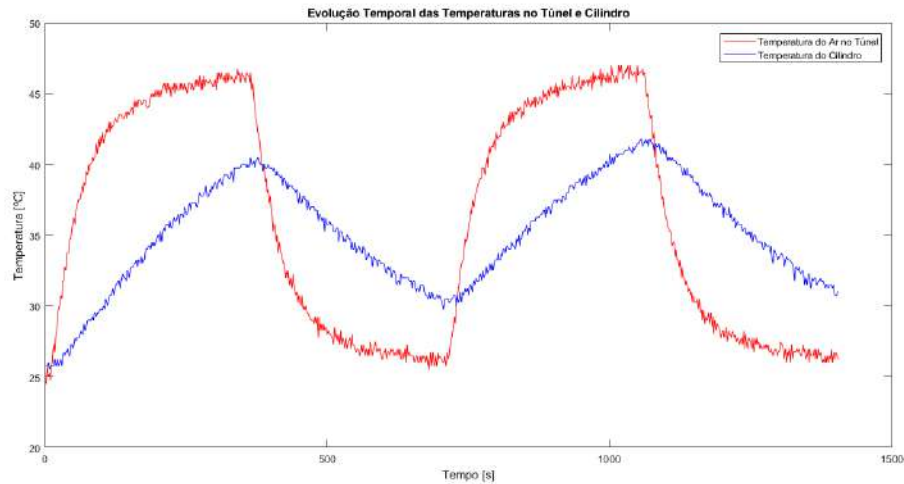


Figura 5.7: Evolução temporal das temperatura do cilindro e do túnel

Imagem gerada no *software* MATLAB

É bem visível a componente de ruído proveniente do motor do túnel aerodinâmico. Para tentar amenizar este ruído, implementaram-se os módulos MAX31855, a ler a cada 100 ms. Os resultados foram os seguintes:

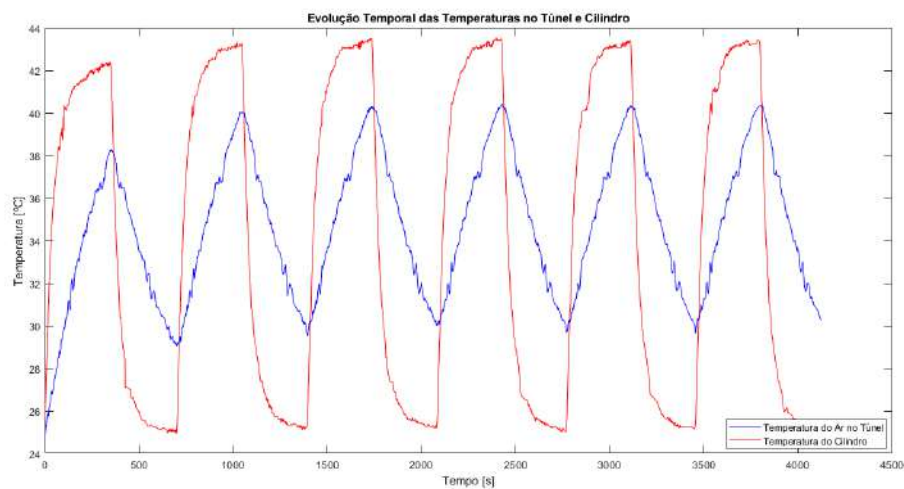


Figura 5.8: Evolução temporal das temperatura do cilindro e do túnel

Imagem gerada no *software* MATLAB

Embora ainda apresente um ruído apreciável, este encontra-se bastante mais amortizado. Será com esta experiência que se procederá à estimativa dos coeficientes da Série de Fourier associada, recorrendo à ferramenta *cftool*. Devido à inércia térmica do material, nos primeiros dois ciclos está presente uma componente de convecção livre acrescida à convecção forçada característica do regime periódico, como é bem visível na figura 5.8. Nesse sentido, desconsideraram-se os dois primeiros ciclos para este estudo. As figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 representam a aproximação da curva experimental às sobreposições das harmónicas, desde uma até quatro. Para cada uma delas, apresentam-se os valores obtidos para a_n, b_n e ω_n , de acordo com a expressão (2.24).

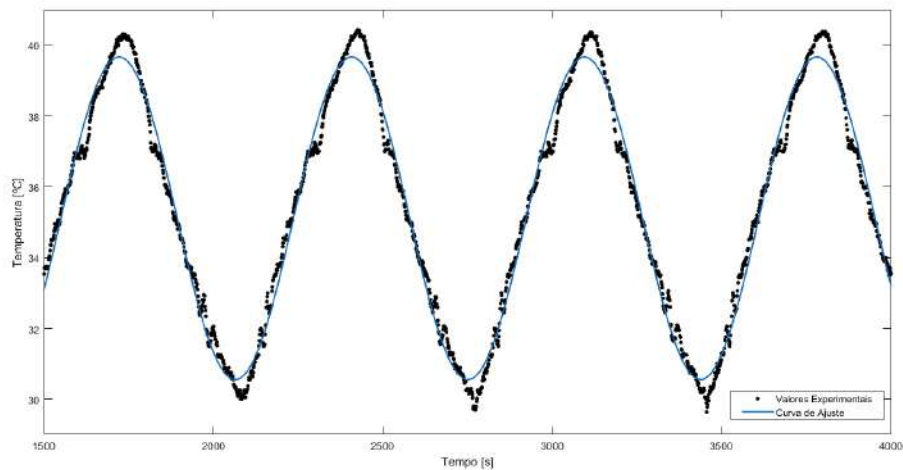


Figura 5.9: Aproximação à curva teórica com uma harmónica

Imagem gerada no *software* MATLAB

$$\begin{aligned} a_0 &= 35,11 & \omega &= 0,0092 \text{ rad/s} \\ a_1 &= -4,55 & b_1 &= -0,23 \end{aligned}$$

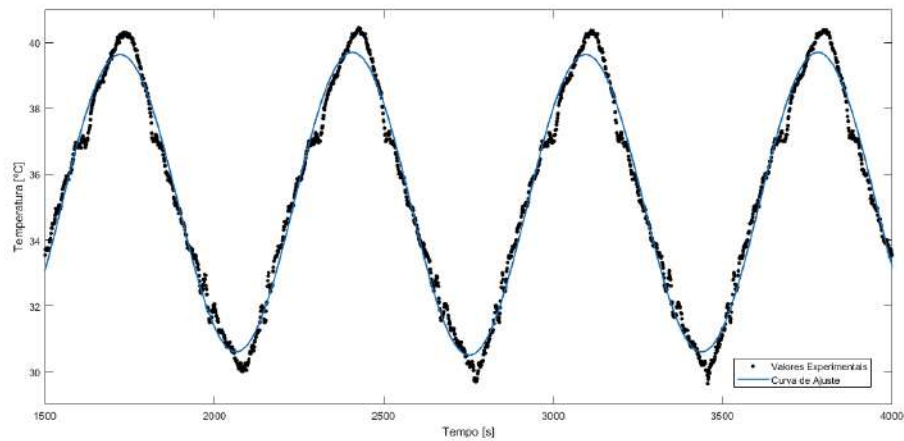


Figura 5.10: Aproximação à curva teórica com duas harmónicas

Imagem gerada no *software* MATLAB

$$\begin{aligned} a_0 &= 35,11 & \omega &= 0,0046 \text{ rad/s} \\ a_1 &= -0,05 & b_1 &= -0,03 \\ a_2 &= -4,55 & b_2 &= -0,16 \end{aligned}$$

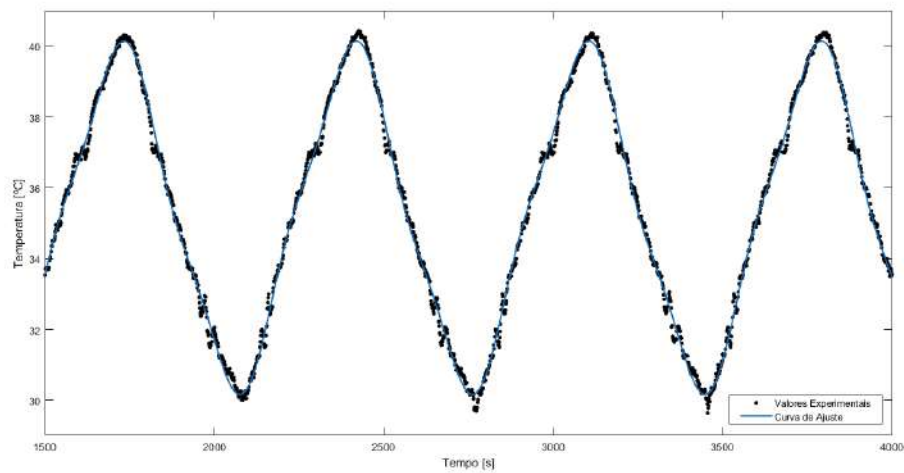


Figura 5.11: Aproximação à curva teórica com três harmónicas

Imagem gerada no *software* MATLAB

$$\begin{aligned} a_0 &= 35,11 & \omega &= 0,0092 \text{ rad/s} \\ a_1 &= -4,54 & b_1 &= -0,28 \\ a_2 &= 0,03 & b_2 &= 0,02 \\ a_3 &= -0,34 & b_3 &= -0,35 \end{aligned}$$

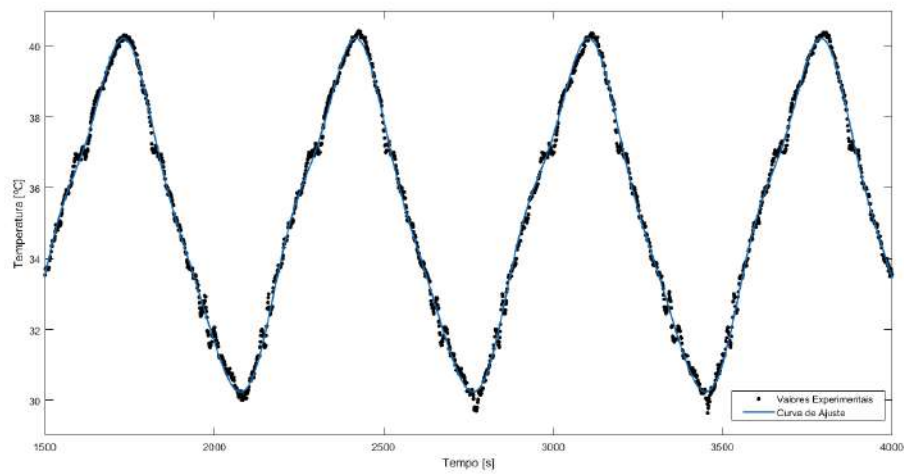


Figura 5.12: Aproximação à curva teórica com quatro harmónicas

Imagem gerada no *software* MATLAB

$$\begin{array}{ll} a_0 = 35,11 & \omega = 0,0092 \text{ rad/s} \\ a_1 = -4,54 & b_1 = -0,26 \\ a_2 = 0,03 & b_2 = 0,02 \\ a_3 = -0,34 & b_3 = -0,35 \\ a_4 = 0,08 & b_4 = 0,02 \end{array}$$

Como não se observaram alterações assinaláveis entre a terceira e a quarta harmónicas, optou-se por não prosseguir.

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

O objectivo principal desta dissertação passava pela implementação com sucesso de um renovado sistema de aquisição de dados em tempo real para um posterior tratamento dos ditos dados, recorrendo a uma tecnologia de baixo custo e facilmente substituível de modo a permitir melhorias à medida que a tecnologia é desenvolvida.

Em ambas as experiências a implementação foi efectuada com sucesso. As montagens foram construídas de acordo com o que foi requisitado, e todo o material está em condições para funcionar devidamente. Na generalidade, este método traz vantagens, na medida em que cada actividade tem a sua placa de aquisição associada, com portabilidade possível. A aquisição é feita em tempo real, e o facto de não ser integralmente constante é desprezável neste caso.

Ainda sobre ambas as experiências, pode-se dizer que o material limita o desempenho, no que diz respeito à frequência de aquisição. Embora o Arduino tenha capacidade de aquisição a frequências muito superiores, o módulo MAX31855 permite apenas medições, no máximo, a cada 100 ms. Contudo, foi debatido com o Orientador e Co-orientador, que esta limitação não afecta significativamente o sucesso da actividade experimental.

Especificamente, na parte do regime transitório, podem ocorrer variações de corrente quando a placa de aquecimento está ligada, e recomenda-se que o computador onde está conectada a ligação USB não seja ligado à corrente eléctrica durante a fase de aquecimento.

No que diz respeito ao regime periódico, o motor do túnel aerodinâmico confere uma componente de ruído que, embora atenuada pela utilização de uma média corrente, não consegue ser totalmente subvertida. No entanto, provou-se que se pode fazer uma aproximação adequada a séries de Fourier com sobreposições de quatro harmónicas. Tal como na actividade experimental em regime transitório, recomenda-se que o computador onde o Arduino estiver ligado não esteja conectado à corrente eléctrica.

Concluindo, prova-se a possibilidade da utilização com sucesso de um sistema de baixo custo que proceda à aquisição de dados em tempo real.

Os alunos da disciplina de Transmissão do Calor terão, a partir de agora, a possibilidade de uma formação e educação mais completa e interessante, e esse era um dos meus principais objectivos a nível pessoal.

6.2 Trabalhos Futuros

Para o futuro propõe-se um acompanhamento regular da evolução tecnológica dos módulos de conversão de sinal analógico para digital e, no caso de ser rentável, considerar o investimento. Tal deve acontecer para que se possa aumentar a frequência de aquisição, de modo a que a média corrente se torne mais suave.

Uma verificação regular dos cabos que fazem a ligação entre os módulos, a *breadboard* e o Arduino também é essencial, de modo a permitir um contínuo desempenho fiável.

Por fim, actualizações da macro PLX-DAQ para o *software* Microsoft Excel são também passíveis de acontecer, e uma atenção especial deve ser dedicada.

Bibliografia

- [1] *Arduino Projects Book*. 2012.
- [2] A. Bejan e A. D. Kraus. *Heat Transfer Handbook*. 1st. JOHN WILEY & SONS, INC., 2003.
- [3] Y. A. Çengel. *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach*. 3rd. McGraw-Hill, 2006.
- [4] M. Gandra et al. "OCEANOGRAPHY : METHODS A low-cost , versatile data logging system for ecological applications". Em: 1995 (2015), pp. 115–126. DOI: 10.1002/1om3.10012.
- [5] Y. Gao et al. "Omnidirectional thermal anemometer for low airspeed and multi-point measurement applications". Em: *Computers and Electronics in Agriculture* 127 (2016), pp. 439–450. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2016.06.011. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.06.011>.
- [6] M. Gosai e S. N. Bhavsar. "Experimental Study on Temperature Measurement in Turning Operation of Hardened Steel (EN36)". Em: 23 (2016), pp. 311–318. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.03.032.
- [7] J. P. Holman. *Heat Transfer*. 10th. McGraw-Hill, 2010.
- [8] F. P. Incropera et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th. JOHN WILEY & SONS, INC., 2011.
- [9] F. Kreith et al. *Principles of Heat Transfer*. 7th. CENGAGE Learning, 2011.
- [10] M. McRoberts. *A Complete Beginners Guide to the Arduino*. 1st. Earthshine, 2009.
- [11] Y. Sun. "Transient Heat Transfer of a Hollow Cylinder Subjected to Periodic Boundary Conditions Transient Heat Transfer of a Hollow Cylinder Subjected to Periodic Boundary Conditions". Em: June (2015). DOI: 10.1115/1.4029757.

Anexo I

Anexo I

```
// Definir bibliotecas
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <MAX31855.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Definir pinos
//Termopar 1 (Temperatura ambiente)
#define SCK_1 8 // 31855 Clock Pin
#define CS_1 9 // 31855 Chip Select
#define SO_1 10 // 31855 Serial Output

//Termopar 2 (Temperatura do disco)
#define SCK_2 2 // 31855 Clock Pin
#define CS_2 3 // 31855 Chip Select
#define SO_2 4 // 31855 Serial Output

// Definir objectos
MAX31855 termopar1(SO_1, CS_1, SCK_1);
MAX31855 termopar2(SO_2, CS_2, SCK_2);

// Definir o LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

// Definir e inicializar variáveis
float ler_temp_ambiente; // Aquisição da temperatura ambiente
float ler_temp_disco; // Aquisição da temperatura no disco
float temp_ambiente = 0; // Temperatura ambiente imprimida para o Monitor, LCD e
Excel
```

```
float temp_disco = 0; // Temperatura do disco imprimida para o Monitor, LCD e Excel
int contador = 0; // Contador que incrementa o índice de leitura e manda escrever no
Monitor, LCD e Excel
int delayLCD = 250; // Delay de inicialização do LCD
int delayEstabiliza = 100; // Delay para estabilizar a placa
int delayLeitura = 2; // Delay entre leituras
```

```
float calibra_termopar_ambiente = 0; // Calibração do termopar que lê a temperatura
ambiente
float calibra_termopar_disco = 0; // Calibração do termopar que lê a temperatura do
disco
const int num_leituras = 20; // Número de leituras no intervalo de tempo pretendido
unsigned long int tempo; // Contador de tempo
const int intervalo_tempo = 2000; // Intervalo de tempo pretendido
```

```
float leitura_ambiente[num_leituras]; // Vector que guarda as leituras da temperatura
ambiente no intervalo de tempo
float leitura_disco[num_leituras]; // Vector que guarda as leituras da temperatura do
disco no intervalo de tempo
int indice_leitura = 0; // Contador que incrementa o índice de leitura
```

```
// Início do setup
```

```
void setup()
{
    lcd.begin(16,2); // 16 caracteres, 2 linhas
    // Inicia com três flashes do LCD
    for(int i = 0; i < 3; i++)
    {
        lcd.backlight();
        delay(delayLCD);
        lcd.noBacklight();
        delay(delayLCD);
    }
    lcd.backlight(); // Fim de inicialização do LCD

    for(int j = 0; j <= num_leituras; j++)
    {
        leitura_ambiente[j] = 0;
        leitura_disco[j] = 0;
    }
}
```

```
// Inicia o ficheiro de Excel, limpando os dados previamente guardados
Serial.begin(115200);
Serial.println("CLEARDATA");
Serial.println("CLEAR SHEET");
Serial.println("LABEL,Data,Hora,Tempo,Temperatura Ambiente,Temperatura do
Disco");
// Fim de inicialização do Excel

    delay(delayEstabiliza);
} // Fim do setup

void loop()
{
    if (contador <= num_leituras)
    {
        ler_temp_ambiente = ler_temp_ambiente - leitura_ambiente[indice_leitura];
        delay(delayLeitura);
        ler_temp_disco = ler_temp_disco - leitura_disco[indice_leitura];
        delay(delayLeitura);

        leitura_ambiente[indice_leitura] = (termopar1.readThermocouple(CELSIUS) +
calibra_termopar_ambiente);
        delay(delayLeitura);
        leitura_disco[indice_leitura] = (termopar2.readThermocouple(CELSIUS) +
calibra_termopar_disco);
        delay(delayLeitura);

        ler_temp_ambiente = ler_temp_ambiente + leitura_ambiente[indice_leitura];
        delay(delayLeitura);
        ler_temp_disco = ler_temp_disco + leitura_disco[indice_leitura];
        delay(delayLeitura);

        indice_leitura = indice_leitura + 1;
        contador = contador + 1 ;
    }

    temp_ambiente = ler_temp_ambiente/num_leituras;
    delay(delayLeitura);
    temp_disco = ler_temp_disco/num_leituras;
    delay(delayLeitura);
```

```
if (indice_leitura >= num_leituras) // Reinicia o índice de leitura
{
    indice_leitura = 0;
}

if (contador > num_leituras) // Escrever no LCD, Excel e Serial Monitor quando o
contador ultrapassa o número de leituras desejado
{
    contador = 0;

    // Escrever no LCD
    // Posição do Cursor: (CHAR, LINE)
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("T Amb = ");
    lcd.print(temp_ambiente,1);
    lcd.print(" C");

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("T Dsc = ");
    lcd.print(temp_disco,1);
    lcd.print(" C");
    // Fim do LCD

    // Escrever no Serial Monitor
    Serial.print("Temperatura Ambiente = ");
    Serial.print(temp_ambiente);
    Serial.println(" C");

    Serial.print("Temperatura do Disco = ");
    Serial.print(temp_disco);
    Serial.println(" C");
    // Fim do Serial Monitor

    tempo = millis()*10e-4;

    // Escrever no Excel
    Serial.println( (String) "DATA,DATE,TIME," + tempo + "," + temp_ambiente + "," +
temp_disco + ",AUTOSCROLL_20");
    // Fim do Excel
```

```
    delay(intervalo_tempo);    // Lê no intervalo de tempo indicado

}    // Fim do ciclo if de Escrever no LCD, Excel e Serial Monitor quando o contador
    ultrapassa o número de leituras desejado

}    // Fim do loop
```


Anexo II

Anexo II

```
// Definir bibliotecas
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <MAX31855.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Definir pinos
//Termopar 1 (Temperatura ambiente)
#define SCK_1 8 // 31855 Clock Pin
#define CS_1 9 // 31855 Chip Select
#define SO_1 10 // 31855 Serial Output

//Termopar 2 (Temperatura do disco)
#define SCK_2 2 // 31855 Clock Pin
#define CS_2 3 // 31855 Chip Select
#define SO_2 4 // 31855 Serial Output

// Definir objectos
MAX31855 termopar1(SO_1, CS_1, SCK_1);
MAX31855 termopar2(SO_2, CS_2, SCK_2);

// Definir o LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

// Definir e inicializar variáveis
float ler_temp_ambiente; // Aquisição da temperatura ambiente
float ler_temp_disco; // Aquisição da temperatura no disco
float temp_ambiente = 0; // Temperatura ambiente imprimida para o Monitor, LCD e
Excel
```

```
float temp_disco = 0; // Temperatura do disco imprimida para o Monitor, LCD e Excel
int contador = 0; // Contador que incrementa o índice de leitura e manda escrever no
Monitor, LCD e Excel
int delayLCD = 250; // Delay de inicialização do LCD
int delayEstabiliza = 100; // Delay para estabilizar a placa
int delayLeitura = 2; // Delay entre leituras
```

```
float calibra_termopar_ambiente = 0; // Calibração do termopar que lê a temperatura
ambiente
float calibra_termopar_disco = 0; // Calibração do termopar que lê a temperatura do
disco
const int num_leituras = 20; // Número de leituras no intervalo de tempo pretendido
unsigned long int tempo; // Contador de tempo
const int intervalo_tempo = 2000; // Intervalo de tempo pretendido
```

```
float leitura_ambiente[num_leituras]; // Vector que guarda as leituras da temperatura
ambiente no intervalo de tempo
float leitura_disco[num_leituras]; // Vector que guarda as leituras da temperatura do
disco no intervalo de tempo
int indice_leitura = 0; // Contador que incrementa o índice de leitura
```

```
// Início do setup
```

```
void setup()
{
    lcd.begin(16,2); // 16 caracteres, 2 linhas
    // Inicia com três flashes do LCD
    for(int i = 0; i < 3; i++)
    {
        lcd.backlight();
        delay(delayLCD);
        lcd.noBacklight();
        delay(delayLCD);
    }
    lcd.backlight(); // Fim de inicialização do LCD
```

```
// Inicia os vectores que guardam as leituras da temperatura
for(int j = 0; j <= num_leituras; j++)
{
    leitura_ambiente[j] = 0;
    leitura_disco[j] = 0;
```

```

    } // Fim de inicialização dos vectores

// Inicia o ficheiro de Excel, limpando os dados previamente guardados
Serial.begin(115200);
Serial.println("CLEARDATA");
Serial.println("CLEAR SHEET");
Serial.println("LABEL,Data,Hora,Tempo,Temperatura Ambiente,Temperatura do
Disco");
// Fim de inicialização do Excel

    delay(delayEstabiliza);
} // Fim do setup

void loop()
{
    if (contador <= num_leituras)
    {
        ler_temp_ambiente = ler_temp_ambiente - leitura_ambiente[indice_leitura];
        delay(delayLeitura);
        ler_temp_disco = ler_temp_disco - leitura_disco[indice_leitura];
        delay(delayLeitura);

        leitura_ambiente[indice_leitura] = (termopar1.readThermocouple(CELSIUS) +
calibra_termopar_ambiente);
        delay(delayLeitura);
        leitura_disco[indice_leitura] = (termopar2.readThermocouple(CELSIUS) +
calibra_termopar_disco);
        delay(delayLeitura);

        ler_temp_ambiente = ler_temp_ambiente + leitura_ambiente[indice_leitura];
        delay(delayLeitura);
        ler_temp_disco = ler_temp_disco + leitura_disco[indice_leitura];
        delay(delayLeitura);

        indice_leitura = indice_leitura + 1;
        contador = contador + 1 ;
    }

    temp_ambiente = ler_temp_ambiente/num_leituras;
    delay(delayLeitura);
    temp_disco = ler_temp_disco/num_leituras;

```

```
    delay(delayLeitura);

    if (indice_leitura >= num_leituras)    // Reinicia o índice de leitura
    {
        indice_leitura = 0;
    }

    if (contador > num_leituras)    // Escrever no LCD, Excel e Serial Monitor quando o
    contador ultrapassa o número de leituras desejado
    {
        contador = 0;

        // Escrever no LCD
        // Posição do Cursor: (CHAR, LINE)
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("T Amb = ");
        lcd.print(temp_ambiente,1);
        lcd.print(" C");

        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("T Dsc = ");
        lcd.print(temp_disco,1);
        lcd.print(" C");
        // Fim do LCD

        // Escrever no Serial Monitor
        Serial.print("Temperatura Ambiente = ");
        Serial.print(temp_ambiente);
        Serial.println(" C");

        Serial.print("Temperatura do Disco = ");
        Serial.print(temp_disco);
        Serial.println(" C");
        // Fim do Serial Monitor

        tempo = millis()*10e-4;

        // Escrever no Excel
        Serial.println( (String) "DATA,DATE,TIME," + tempo + "," + temp_ambiente + "," +
temp_disco + ",AUTOSCROLL_20");
        // Fim do Excel
```

```
    delay(intervalo_tempo);    // Lê no intervalo de tempo indicado

}    // Fim do ciclo if de Escrever no LCD, Excel e Serial Monitor quando o contador
ultrapassa o número de leituras desejado

}    // Fim do loop
```